

Numerical hydraulic modeling of the flow in the composite structure of the multiple rectangular Lopac Gate with gradual transformation

Behnam Adineh¹, Seyed Mohsen Sajjadi², Javad Ahadiyan³, and Mohammad Karamdokht Behbahani⁴

1. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: mohamadkb050@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.sajjadi@scu.ac.ir
3. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir
4. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: karamdokhtmohamad@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received 15 July 2025
Received in revised form 11 November 2025
Accepted 27 December 2025
Available online 23 September 2026

Keywords:

Lopac Gate,
gradual transformation,
maximum shear stress,
flow coefficient,
Flow3D.

ABSTRACT

Objective: This comprehensive study systematically evaluates the hydraulic characteristics of multi-rectangular Lopac gates incorporating gradual transformation features, with particular emphasis on their comparative performance against traditional non-transformed gate designs.

Method: Through detailed experimental analysis under controlled flow conditions (20–60 L/s), the hydraulic behavior of multi-rectangular Lopac gates with 5° and 10° transformation angles was investigated at gate openings of 30°, 45°, and 60°. Shear stress distribution, discharge characteristics, flow coefficients, and vortex dynamics were evaluated using detailed flow visualization studies.

Results: For shear stress distribution, the 5° transformed configuration demonstrated substantial reductions of 27%, 13%, and 10% in maximum floor stress at gate openings of 30°, 45°, and 60°, respectively. Conversely, the 10° transformation increased floor stresses by 53%, 21%, and 24% at corresponding openings. The 5° transformation enhanced flow coefficients by 2.4%, 3.0%, and 3.4% for 30°, 45°, and 60° openings, respectively, while the 10° transformation yielded improvements of 8%, 13%, and 10%. Flow visualization showed that transformed gates produce larger, more organized vortices with reduced frequency, whereas conventional designs generate numerous smaller and more chaotic vortices.

Conclusions: The findings show that gradually transformed multi-rectangular Lopac gates improve stress distribution, flow efficiency, and vortex control. The 5° transformation reduces floor stress, while the 10° transformation improves flow coefficients but increases stress. An optimal transformation angle between 5° and 10° may further enhance gate performance.

Cite this article: Adineh, B., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, J., & Karamdokht Behbahani, M. (2026). Numerical hydraulic modeling of the flow in the composite structure of the multiple rectangular Lopac Gate with gradual transformation. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 1-25. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12435.1176>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12435.1176>

Publisher: Razi University.

Introduction

Accurate flow measurement in open canals and irrigation networks represents a critical component of sustainable water resources management. As global water scarcity intensifies, optimizing the efficiency of water distribution systems has become increasingly vital. Among various control structures, gates and spillways have received considerable research attention due to their pivotal role in flow regulation. The Lopac Gate, a unique water-sealing structure designed for precise depth control, employs a distinctive dual-rectangular plate configuration mounted to channel walls. This innovative design enables simultaneous upstream water level adjustment and downstream flow regulation across varying discharge rates and gate openings, offering distinct advantages over conventional gate systems in irrigation applications.

Method

Experimental Setup

The experimental investigation was conducted in the state-of-the-art hydraulic laboratory at Shahid Chamran University of Ahvaz's Faculty of Water Sciences. The primary test facility consisted of a 10-meter long rectangular flume with 0.8 m width and height, featuring an aluminum base, transparent glass sidewalls for flow visualization, and a reinforced metal sheet floor to withstand prolonged hydraulic loading.

The study employed a precisely calibrated elliptical Lopac Gate prototype fabricated from 2 mm galvanized steel sheet (40 cm $\times$ 40 cm dimensions), mechanically hinged to the flume wall at 4.1 m downstream from the inlet. Experimental parameters systematically varied included:

Flow rates: 25, 35, and 45 L/s (controlled via calibrated flow meters). Gate openings: 35°, 40°, 45°, 50°, and 52.5° (measured with digital inclinometer). Submergence ratios: 70%, 80%, and 90% of gate height. Figure 1 illustrates the experimental configuration, showing both the flume cross-section and the elliptical Lopac Gate assembly. All tests were conducted under steady-state flow conditions, with measurements recorded after complete flow stabilization to ensure data reliability.

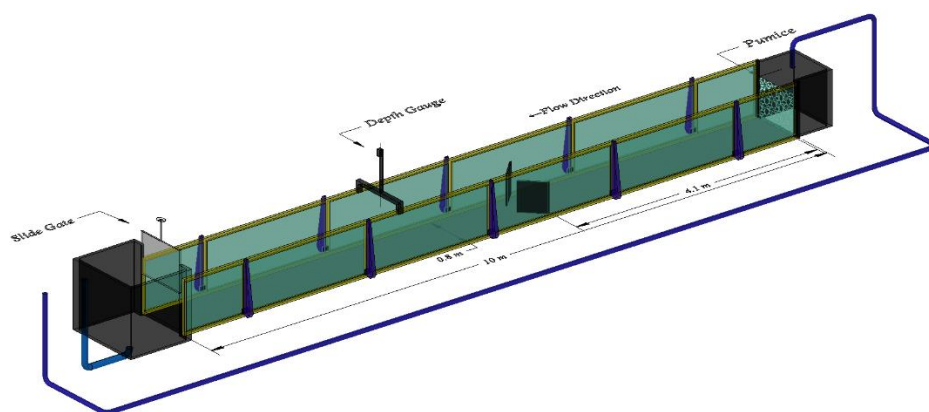


Figure 1. Overview of the laboratory flume

Verification of the physical model

For this purpose, 5 rectangular salon valve models from experiments were simulated at a flow rate of 25 (liters per second), an opening of (30, 35, 40, 45, 50, and 52.5) degrees, and a submergence of 70 percent, and their results were evaluated and compared with the values obtained with the laboratory model. After the studies, it was found that the modeling performed in the Flow3D software

did not differ significantly from the experimental values and had a small error percentage of 1.23 percent. The calibration results between the numerical modeling values and their comparison with the laboratory sample are shown in Figure 2.

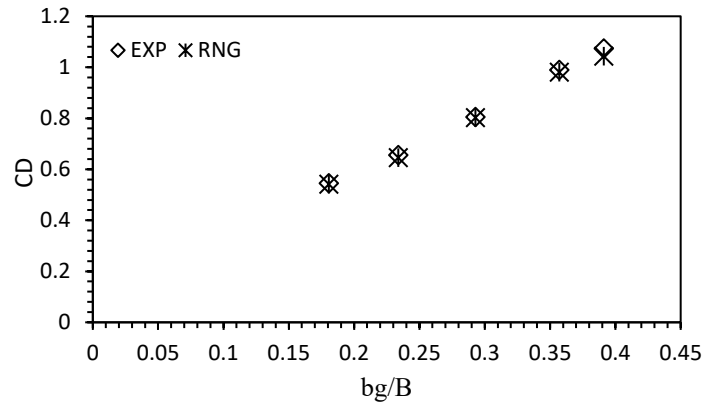


Figure 2. Laboratory model validation results compared to numerical simulation

Meshing and boundary conditions in model simulation

In this study, in order to achieve the best meshing, three mesh groups with numbers (500,000, 1,000,000, and 2,000,000) were selected for the entire mesh block area. For this purpose, in the present study, by simulating a laboratory model of a rectangular Lopac Gate with a flow rate of 25 liters per second, an opening of 52.5 degrees, and a submergence of 70%, and comparing the increase in the agreement of the results with the laboratory data, the optimal meshing was finally selected for the aforementioned model. The absolute error percentage between the laboratory and numerical results was calculated to be 2.048 percent. Finally, the number of mesh cells of 1,000,000 was used for simulation.

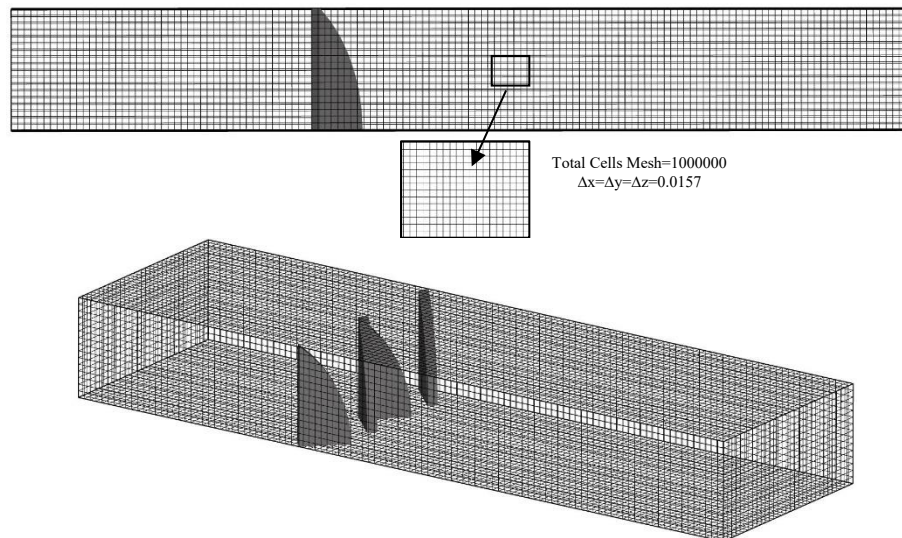


Figure 3. Simulation network meshing

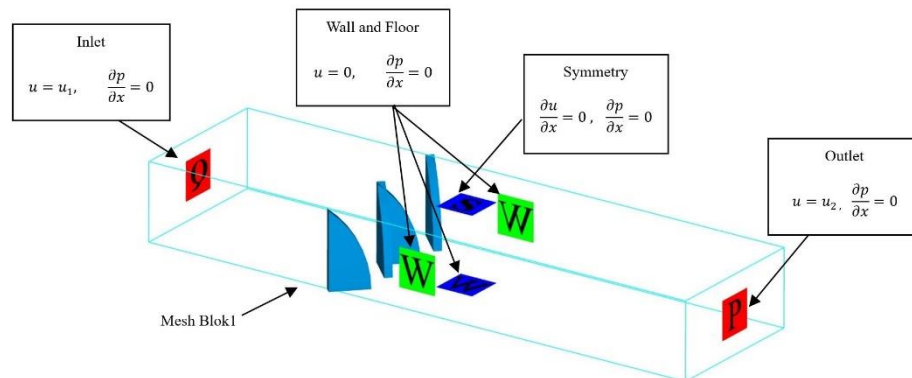


Figure 4. Boundary conditions applied to the computational domain of the multiple elliptical valve under consideration

Results

Investigation of the flow coefficient in multiple Lopac Gates

It is observed that by creating a gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the flow coefficient will increase compared to the Gate condition without gradual transformation. In this way, the flow coefficient value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual transformation at an angle of 5 degrees at flow rates of (20, 40 and 60) liters per second, at openings of 30, 45 and 60 degrees will increase by 2.4%, 3% and 3.4% respectively compared to the multiple rectangular Lopac Gate without gradual transformation. Also, the flow coefficient value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual conversion at an angle of 10 degrees at flow rates of (20, 40, and 60) liters per second, at openings of 30, 45, and 60 degrees will increase by 8%, 13%, and 10%, respectively, compared to multiple rectangular Lopac Gates without gradual conversion.

Shear stress study in multiple Lopac Gates

It is observed that by creating a gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the maximum shear stress will increase compared to the valve condition without gradual transformation. In such a way that the maximum shear stress value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual transformation with an angle of 5 degrees at flow rates of (20, 40 and 60) liters per second, at openings of 30, 45 and 60 degrees will increase by 27%, 13% and 10% respectively compared to the multiple rectangular Lopac Gate without gradual transformation. Also, the maximum shear stress value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual transformation at an angle of 10 degrees at flow rates of (20, 40, and 60) liters per second, at openings of 30, 45, and 60 degrees will increase by 51%, 21%, and 24%, respectively, compared to multiple rectangular Lopac Gates without gradual transformation.

Investigation of flow vortices in multiple rectangular Lopac Gates

The results showed that the vortices created by the flow around the Lopac Gate often occur near the gate, which can be observed by observing the decrease in velocity values and color changes in these areas. Finally, According to the shapes related to multiple rectangular Lopac gates with gradual transformation, it was found that the water flow and vortices are

diverted towards the channel walls. However, considering the shapes related to multiple rectangular Lopac gates without gradual transformation at opening angles (45 and 60) degrees, it was found that the flow and vortices created often occur in the center of the channel, which causes erosion and scouring in the center of the channel.

Conclusions

In this study, the effect of gradual transformation on the performance of multiple rectangular Lopac Gates in free flow conditions and its comparison with multiple Lopac Gates without gradual transformation and the investigation of parameters such as discharge coefficient, maximum shear stress on the channel floor and flow lines at different discharges and openings using Flow3D software have been carried out. The aim of this study is to improve and increase the efficiency of multiple rectangular Lopac Gates in comparison with other models of this structure. The results showed that by creating gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the discharge coefficient will increase compared to the Gate condition without gradual transformation. It was also observed that by creating gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the maximum shear stress will increase compared to the Gate condition without gradual transformation.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

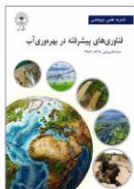
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مدل سازی عددی هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی

بهنام آدینه^۱، سیدمحسن سجادی^{۲*}، جواد احدیان^۳، و محمد کرم دخت بهبانی^۴

۱. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: mohamadkb050@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.sadjadi@scu.ac.ir

۳. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir

۴. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: Karamdokhtmohamad@gmail.com

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این پژوهش، ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی دریاچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارای تبدیل تدریجی و مقایسه عملکرد آن‌ها با دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه فاقد تبدیل تدریجی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	روش پژوهش: آزمایش‌ها با دبی‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و در بازدهی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه انجام شد. عملکرد دریاچه‌ها با تبدیل تدریجی در زوایای ۵ و ۱۰ درجه و دریاچه فاقد تبدیل تدریجی، از نظر تنش برشی کف، ضریب دبی عبوری و ویژگی‌های گردابه‌های جریان مورد بررسی قرار گرفت.
کلیدواژه‌ها: دریاچه سالونی، تبدیل تدریجی، تنش برشی حداکثر، ضریب دبی، Flow3D	یافته‌ها: در تبدیل ۵ درجه، تنش حداکثر وارد بر کف در بازدهی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۲۷، ۱۳ و ۱۰ درصد و در تبدیل ۱۰ درجه به ترتیب ۵۳، ۲۱ و ۲۴ درصد نسبت به دریاچه فاقد تبدیل تدریجی افزایش یافت. ضریب دبی در تبدیل ۵ درجه به ترتیب ۴/۲، ۳ و ۳/۴ درصد و در تبدیل ۱۰ درجه به ترتیب ۸، ۱۳ و ۱۰ درصد افزایش یافت. همچنین، در دریاچه‌های دارای تبدیل تدریجی، گردابه‌های بزرگ‌تر و منظم‌تری مشاهده شد، درحالی‌که در دریاچه فاقد تبدیل، گردابه‌ها کوچک‌تر و تعداد آن‌ها بیشتر بود.
	نتیجه‌گیری: دریاچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارای تبدیل تدریجی، با بهبود عملکرد هیدرولیکی، می‌توانند به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای اندازه‌گیری و کنترل جریان در کانال‌های روباز مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: آدینه، بهنام؛ سجادی، سیدمحسن؛ احدیان، جواد؛ و کرم دخت بهبانی، محمد. (۱۴۰۵). مدل سازی عددی هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۳)، ۲۵-۱.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12435.1176>



مقدمه

اندازه‌گیری دبی در کانال‌های باز و شبکه‌های آبیاری یکی از ارکان اساسی مدیریت آب است (اسکوگر بو و همکاران^۱، ۱۹۷۲). دریاچه‌ها، سرریزها و همچنین پارشال فلوم‌ها به طور عمده در اندازه‌گیری جریان عبوری و کنترل سطح آب در کانال‌ها و مجراها مورد استفاده قرار می‌گیرند (العابدی و خاسف^۲، ۲۰۲۴؛ آیزلدین و همکاران^۳، ۲۰۲۳؛ پوری و همکاران^۴، ۲۰۲۳). داشتن روابط و بهره‌برداری ساده از مهم‌ترین دلایل استفاده از دریاچه‌ها و سرریزها، تحت عنوان سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان است (چاو^۵، ۱۹۵۹؛ دانشفراز و همکاران^۶، ۲۰۲۲a). یکی از نکات بسیار مهم در دریاچه‌ها برای بهره‌برداری ساده‌تر مسئله نیروی درگ ناشی از وجود و رشد نیزار در پایین‌دست دریاچه‌ها و اعمال نیروی کششی ناشی از آنها است که می‌تواند شرایط هیدرولیکی جریان در پایین‌دست را دچار تغییرات فراوانی نماید (فتیحی مقدم و همکاران، ۲۰۲۴؛ صلاحی و همکاران، ۲۰۲۴؛ سلمان‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴). به جهت افزایش راندمان و بهبود عملکرد سیستم‌های آبرسانی و شبکه‌های توزیع جریان مطالعات گسترده‌ای در زمینه دریاچه‌ها و سرریزها صورت گرفته است (نگم و همکاران^۷، ۲۰۰۲؛ هایاوی و همکاران^۸، ۲۰۰۸؛ کارولو و همکاران^۹، ۲۰۱۳؛ افضلیان و احدیان، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶؛ سجادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ یارمحمدی و احدیان، ۲۰۱۶؛ منصوری و احدیان، ۲۰۱۶؛ احدیان و همکاران، ۲۰۲۴؛ شریفی فرد و همکاران، ۲۰۲۴). دریاچه‌ها در برخی مواقع به عنوان یک‌بند برای تنظیم جریان در مسیر رودخانه‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت نوع بهره‌برداری از آنها و عملیات هماهنگی که بین دریاچه‌های مختلف در سدها اتفاق می‌افتد نیز در کنترل و تنظیم جریان پایین‌دست هم در شرایط نرمال و شرایط سیلابی بسیار حائز اهمیت است (احدیان و همکاران، ۲۰۲۴؛ چناری و همکاران، ۲۰۲۴؛ سجادی و همکاران، ۲۰۲۳؛ نیسی و همکاران، ۲۰۲۴).

دریاچه‌ها انواع مختلفی دارند که یکی از آنها دریاچه‌های سالونی بوده که به عنوان آب‌بند یا سازه کنترل عمق جریان مطرح است (کرم دخت بهبهانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ سجادی و همکاران، ۲۰۲۰). دریاچه‌های سالونی به صورت دو ورق مستطیلی شکل بوده که به دیواره کانال متصل می‌شود، این سازه قابلیت تنظیم سطح آب در بالادست دریاچه و تنظیم توزیع آب عبوری در پایین‌دست دریاچه را در دبی‌ها و بازشدگی‌های مختلف دارا است (آواد و کینزلی^{۱۰}، ۲۰۰۶). از طرفی دریاچه‌های سالونی به دو دسته مستطیلی و بیضوی تقسیم شده‌اند (لانگمن و همکاران^{۱۱}، ۱۹۸۰؛ کاکس و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۴؛ خیبر و همکاران، ۲۰۲۰). در ادامه به مروری بر پژوهش‌های مرتبط با دریاچه سالونی پرداخته می‌شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه پژوهش حاضر به انجام رسیده است که به صورت مختصر در دو طبقه‌بندی مطالعات داخل و خارج از کشور ارائه می‌گردد.

¹ Skogerboe et al

² Alabedi and Khassaf

³ Eizeldin et al

⁴ Puri et al

⁵ Chow

⁶ Daneshfaraz et al

⁷ Negm et al

⁸ Hayawi et al

⁹ Carollo et al

¹⁰ Oad and Kinzli

¹¹ Langeman et al

¹² Cox et al

۱. مطالعات داخل کشور

خیر و همکاران (۱۴۰۴) در تحقیقی سرریزهای جانبی لولایی خاص با وجود آستانه را به صورت آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار دادند. آنها گونه‌ای از سرریزهای لبه تیز مایل را معرفی نمودند. در تحقیق آنها یک سرریز لولایی تحت عنوان *PSW-HC* (مدل سرریز جانبی لولایی با کناره ابتدایی باز و انتهای بسته) نسبت به مدل شاهد بهینه‌تر بوده و ضریب دبی و راندمان بیشتری دارد. طاهری طلاوری و همکاران (۱۴۰۳) در یک بررسی عددی، شرایط دریچه‌های سالونی چندگانه را مورد شبیه‌سازی قرار داد. در این پژوهش آنها پارامترهای هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق بررسی شد. یافته‌های این محققین نشان داد ضریب دبی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با شرایط جریان آزاد، در بازشدگی ۳۰ درجه، به طور متوسط با افزایش درصد استغراق می‌تواند تا حدود ۴۵ درصد، و برای بازشدگی ۴۵ درجه، تا حدود ۵۴ درصد، کاهش یابد.

خیر و همکاران (۱۴۰۳) از یک بخش آستانه با زاویه قائم ثابت و یک بخش لولایی مایل با قابلیت تغییر زاویه این بررسی‌ها را ادامه دادند. این محققین یک رابطه خطی به منظور محاسبه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی به دست آوردند. یافته‌های آنها نشان داد که بازشدگی مدل رو به کانال فرعی باعث عملکرد مثبت‌تر در سرریز جانبی لولایی می‌شود.

فتحی و همکاران (۱۴۰۳a,b)، در دو تحقیق جداگانه، در یکی به بررسی پارامترهای هیدرولیکی نظیر ضریب تخلیه، مقدار استهلاک انرژی، شرایط پروفیل جریان و در دیگری به بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر، گردابه‌ها، پروفیل سرعت و تغییرات تنش برشی در محدوده دریچه‌های سالونی چندگانه مستطیلی پرداختند. بررسی بیشینه سرعت در تحقیق آنها نشان داد که این پارامتر با میزان استغراق رابطه عکس دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش استغراق، بیشینه سرعت کاهش می‌یابد. همچنین در تحقیق دوم با بررسی کیفی گردابه‌های جریان مشخص نمود که گردابه‌ها در حالت تک دریچه قدرت و کشیدگی بیشتری نسبت به حالت دو دریچه دارند. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد استغراق، کشیدگی و قدرت گردابه‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی محدوده توزیع سرعت و تنش برشی با دبی و زاویه بازشدگی رابطه‌ای مستقیم داشته‌اند. همچنین بیشینه نیروی افقی وارده بر دریچه با دبی، زاویه بازشدگی و استغراق رابطه مستقیم دارد و در حالت چندگانه نسبت به حالت تک دریچه ۳۳.۵ درصد کاهش می‌یابد.

کرم دخت بهبهانی و همکاران (۱۴۰۲)، به مدلسازی پارامترهای مؤثر هیدرولیکی نظیر سرعت و استهلاک انرژی در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در حالت مستغرق با میزان استغراق ۷۰ درصد پرداختند. نتایج این محققین نشان داد در حالت مستغرق سرعت بیشینه و استهلاک نسبت به حالت آزاد در تمامی سناریوهای آزمایشی به طور متوسط حدود ۳۲ و ۶۱ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی جریان عبوری از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه در حالت آزاد، گردابه‌های با قدرت زیاد و محدوده اثرگذاری وسیع در جریان ایجاد می‌نماید که تا پایین دست دریچه نیز امتداد دارد؛ ولی حالت مستغرق باعث کاهش قدرت گردابه‌ها می‌شود.

کرم دخت بهبهانی و همکاران (۱۴۰۲)، مدلسازی هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه با استفاده از *Flow-3D* را انجام دادند. نتایج نشان داد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی چندگانه، تنش برشی بیشینه نسبت به حالت تک دریچه در تمامی آزمایش‌ها در بازشدگی‌ها و دبی‌های مختلف به طور میانگین ۳۸ درصد کاهش یافته است. در بررسی کیفی گردابه‌های جریان نیز بررسی‌ها نشان داد، در زمان استفاده از دو دریچه، وسعت گردابه، کشیدگی و قدرت آن نسبت به حالت تک دریچه کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها در مقایسه با زمانی که از تک دریچه استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد. مبارک و همکاران (۱۴۰۰) دریچه‌های سالونی بیضوی را مورد بررسی و تحلیل آزمایشگاهی قرار دادند و اثر میزان کشیدگی هندسی بیضی در شکل دریچه‌ها را بررسی نمودند. این محققین به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت قطرهای بیضی و یا به عبارتی افزایش کشیدگی بیضوی باعث کاهش تنش برشی اعمال شده از سوی جریان بر کف مجرای دریچه‌ها می‌شود. همچنین یافته‌های آنان نشان داد که گردابه‌های پس از دریچه با افزایش این نسبت کاهش می‌یابد.

شفاعی بجستان و همکاران (۱۳۹۹)، ضریب دبی دریچه‌های سالونی بیضوی مسلح شده با تبدیل تدریجی را به صورت تک دریچه در حالت مستغرق بررسی نمودند. نتایج تحقیق این محققین به صورت آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر مقدار افزایش

ضریب دبی تا ۱۰ درصد می تواند به وقوع بپیوندد که این افزایش به دلیل قرارگیری تبدیل تدریجی در بالادست دریاچه سالونی اتفاق می افتد.

خیبر و همکاران (۱۳۹۹)، با کمک معادله انرژی و نتایج آزمایشگاهی، به بررسی خصوصیات جریان عبوری از دریاچه های سالونی بیضوی و مقایسه با دریاچه سالونی مستطیلی به صورت تک دریاچه را در شرایط جریان آزاد پرداختند. آزمایش ها نشان داد که در وضعیت جریان آزاد، ضریب دبی تنها تابعی از نسبت بازشدگی دریاچه است. همچنین مشخص شد در وضعیت یکسان، با کم شدن بازشدگی، ضریب دبی دریاچه سالونی- بیضوی نسبت به دریاچه سالونی مستطیلی افزایش می یابد. در همین راستا مقایسه نتایج تحقیق یاد شده با تحقیقی که به تبدیل ناگهانی مجهز شده است در مطالعه سجادی و همکاران (۱۳۹۹) دیده می شود. یوسفوند و همکاران (۱۳۹۴)، در یک مطالعه آزمایشگاهی-تئوری به بررسی ضریب تخلیه دریاچه های سالونی مستطیلی با حالات مختلف نسبت استغراق پرداختند. این محققین یک رابطه نیمه تجربی با دقت قابل قبولی برای محاسبه ضریب دبی این دریاچه ها بر حسب مقدار بازشدگی و نسبت استغراق ارائه دادند.

۲. مطالعات خارج از کشور

کرم دخت بهبهانی و همکاران (۲۰۲۵) طراحی جدیدی از یک سری دریاچه سالونی ارائه دادند. آنها به صورت عددی به بررسی عملکرد هیدرولیکی ساختار پیشنهادی و مقایسه آنها با دریاچه شاهد تحت شرایط یکسان پرداختند. بر اساس بهینه سازی عددی برای این منظور تعداد مش بهینه در تحقیق آنها ۱,۰۰۰,۰۰۰ در نظر گرفته شد و مدل تلاطمی RNG بهترین عملکرد هیدرودینامیکی را داشت. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از چندین دریاچه LOPAC، میانگین حداکثر سرعت در مقایسه با حالت تک دریاچه حدود ۱۸ درصد کاهش می دهد. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج تحقیق آنها ضریب تخلیه دریاچه های چندگانه با حالت مشابه ولی تک دریاچه، تفاوت زیادی نخواهد داشت.

در تحقیقی دیگر پیل بالا و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر نسبت بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریاچه LOPAC با استفاده از شبیه سازی های CFD بررسی نمودند. بر اساس نتایج این محققین، این دریاچه ها وقتی به دایره ای به کار گرفته شوند، شرایط مناسب تری برای تخلیه جریان را باعث می شوند. ایشان بیان نمودند در برخی مواقع در پیش بینی های مدل، چرخش نامتقارن در پایین دست دریاچه مشاهده می شود. آنان مقادیر استهلاک انرژی، ضریب آبگذری و ضریب اتلاف انرژی را در دبی ها، بازشدگی ها و در نسبت های مختلف مورد بررسی قرار دادند.

تائو و همکاران ^۱ (۲۰۲۲)، ضریب تخلیه در یک دریاچه شعاعی را ارزیابی کردند. مدل های یادگیری ماشینی عملکرد پیش بینی قابل قبولی داشتند و دقت پیش بینی مدل ها در شرایط جریان آزاد بهتر بود. سیهاگ و همکاران ^۲ (۲۰۲۲)، ضرایب تخلیه دریاچه های شعاعی را با استفاده از رویکردهای رگرسیون فرابتنکاری بررسی کردند و نتایج، مفید بودن روش رگرسیون GP را برای پیش بینی ضریب تخلیه نشان داد.

دانشفراز و همکاران ^۳ (۲۰۲۲) به صورت تجربی و عددی به بررسی تأثیر آستانه ها با مشخصات هندسی متفاوت بر ویژگی های هیدرولیکی جریان عبوری از دریاچه های کشویی پرداختند. نتایج شبیه سازی نشان داد که شاخص های آماری مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و LES دقت بالاتری دارد. همچنین ایشان به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی رابطه معکوسی با بازشدگی دریاچه دارد. از طرفی نتایج این محققین نشان داد ضریب تخلیه دریاچه ها با ضخامت آستانه متفاوت، همواره بیشتر از حالت بدون آستانه است.

خیبر و همکاران ^۴ (۲۰۲۱)، به جهت توسعه ی دریاچه های سالونی به صورت تک دریاچه به مطالعه ی تأثیر تنگ شدگی ناگهانی مقطع بر روی عملکرد هیدرولیکی دریاچه های سالونی بیضوی در دبی ها و استغراق های مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب آبگذری با میزان استغراق دریاچه و انقباض کانال رابطه غیر مستقیم داشته و با بازشدگی دریاچه رابطه مستقیم دارد.

¹ Tao et al

² Sihag et al

³ Daneshfaraz et al

⁴ Kheybar et al

پیل بالا و همکاران^۱ (۲۰۲۱) در یک تحلیل آزمایشگاهی، ارتباط بین زاویه بازشدگی و میزان تخلیه تک دریچه سالونی بیضوی در حالت جریان مستغرق را بررسی نمودند. نتایج این محققین نشان داد که حداکثر تا ۲۰ درصد کاهش افت انرژی نسبی و به تبع آن افزایش ضریب تخلیه دریچه ممکن است رخ دهد.

شادهی و بی‌جن‌خان^۲ (۲۰۲۰)، آزمایش‌هایی بر جت‌های موازی خروجی از دریچه‌های تنظیم‌کننده برای شرایط جریان آزاد و مستغرق انجام داده‌اند. این محققین از ضرایب تصحیح مونتوم مرتبط، β_2 ، برای شرایط جریان آزاد استفاده نمودند. نتایج این محققین نشان داد که رابطه نیمه‌تجربی برای دریچه‌های نصب‌شده به‌صورت موازی با بازشدگی‌ها و عرض‌های مختلف دریچه تمایز بین شرایط جریان آزاد و مستغرق را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند.

کاکس و همکاران^۳ (۲۰۱۴) سرریزهای لبه تیز بیضوی نوینی برای تخلیه جریان‌های چگال پیشنهاد دادند. آنها یک مدل فیزیکی با شرایط واقعی را ساختند و داده‌های دبی-اشل سرریز جدید را جمع‌آوری نمودند. این محققین از تقریب انتگرالی سیمسون و دوزنقه‌ای برای توسعه راه‌حل صریح استفاده نمودند. میانگین درصد خطای مطلق تنها ۳/۵۵ برآورد.

نگم و همکاران^۴ (۲۰۰۶) تأثیر هم‌زمان چندین دریچه بر الگوی جریان و سرعت در پایین‌دست دریچه برای حالت جریان مستغرق را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که الگوی جریان و سرعت در حالات مختلف بازشدگی دریچه‌ها، به نوع آنها (اصلی یا اضطراری)، نسبت استغراق و عدد فرود در ناحیه جمع‌شدگی جریان وابسته است.

سامانه‌های آکوا^۵ (۲۰۰۰) برای ارائه یک راه‌حل کارآمد و به‌صرفه باهدف کنترل جریان در کانال‌های حاوی ابعاد متفاوت دریچه سالونی ارائه داده است. در راه حل آنها روابطی برای تخمین دبی و ضریب آگذری جریان در شرایط آزاد و مستغرق با آستانه درجه استغراق ۰/۳ ارائه شده است.

با بررسی پیشینه پژوهش یافت شد که تاکنون مطالعات مرتبط با دریچه‌های سالونی به طور عمده در حالت تک دریچه انجام شده است که این موضوع حاکی از کمبود مطالعات در زمینه حالت‌های چندگانه و نیاز به مطالعه بیشتر بر این شرایط است. از طرفی تأثیر استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه به‌جای دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در این دو حالت با یکدیگر مقایسه نشده است؛ بنابراین، در مطالعه حاضر به بررسی عددی دریچه سالونی بیضوی چندگانه و دریچه سالونی مستطیلی چندگانه و مقایسه عملکرد آنها نسبت به هم دیگر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته خواهد شد. نتایج پژوهش حاضر در ۴ بخش، تغییرات حداکثر سرعت، اتلاف انرژی، ضریب دبی و الگوی جریان در شرایط آزاد ارائه خواهد شد. انجام این پژوهش مؤثر در افزایش کارایی و همچنین ارتقا و صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت، در شبکه انتقال آب است و منجر به دستیابی به بینش بیشتری نسبت به عملکرد و رفتار هیدرولیکی در زمینه دریچه‌های سالونی می‌گردد. همچنین عملکرد این دو سازه در مقایسه با سایر تحقیقات گذشته ارزیابی و امکان استفاده از آن در شبکه‌های انتقال آب برای کنترل سطح آب بررسی می‌گردد. در نهایت این یافته‌ها اهمیت استفاده از CFD را به‌عنوان ابزاری برای حمایت از تصمیم‌گیری و طراحی سازه‌های هیدرولیکی برجسته می‌کنند.

روش پژوهش

۱. مشاهدات آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق از نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط پیل بالا و همکاران^۶ (۲۰۲۱) اخذ گردید. این آزمایش‌ها در یک کانال (فلوم) مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۸ متر، ساخته شده با پایه آلومینیومی و دیوارهای جانبی شیشه‌ای و کف از جنس ورق فلزی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

^۱ Pilbala et al

^۲ Shaddehi and Bijankhan

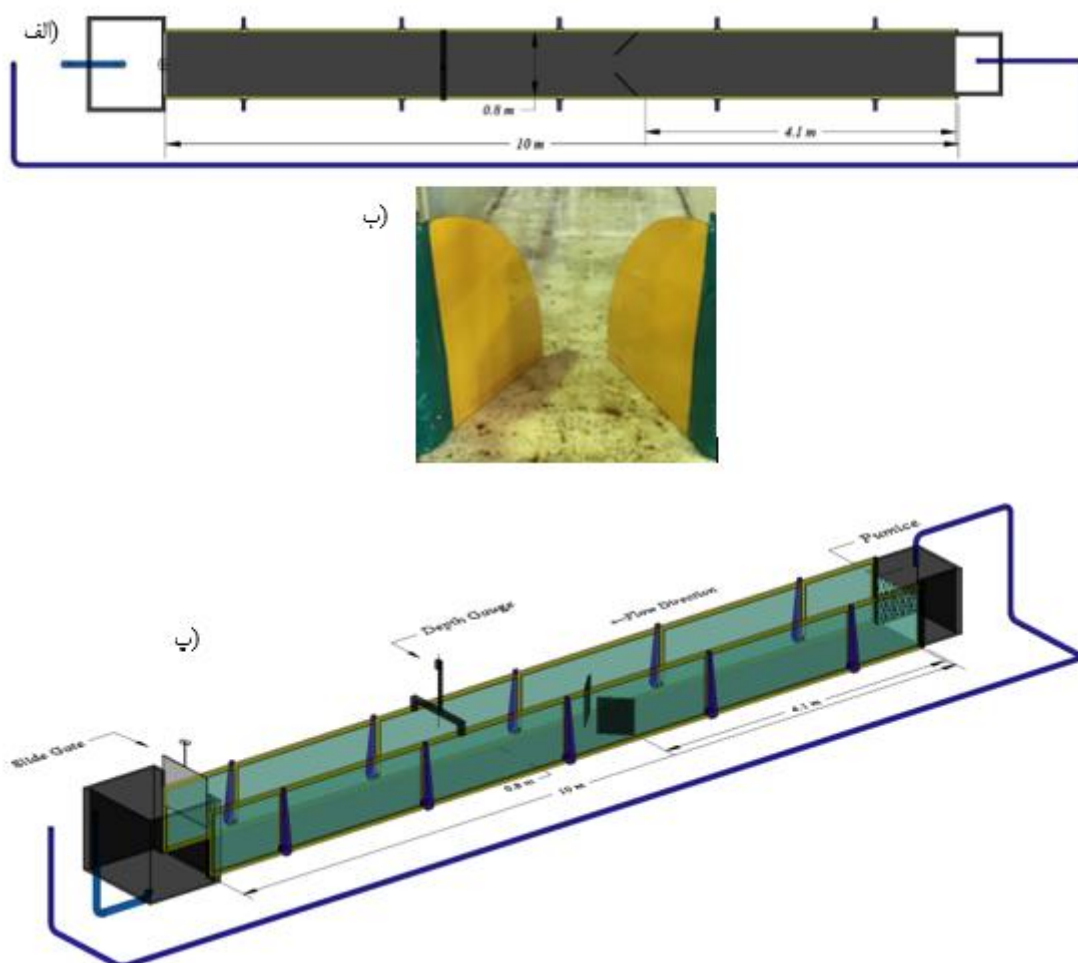
^۳ Cox et al

^۴ Negm et al

^۵ Aqua Systems

^۶ Pilbala et al

دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (شکل ۱-الف). در فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده یک سرریز لبه تیز مستطیلی در بخش انتهایی آن قبل از مخزن جمع کننده وجود داشت که می توان با استفاده از آن دبی ورودی را اندازه گیری نمود. در این پژوهش از دبی های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه استفاده شده است. یک سبد توری پر شده از پوکه های معدنی با هدف آرام کردن جریان ورودی و از بین بردن امواج در ابتدای کانال قرار داده شده است. همچنین به منظور ایجاد استغراق در پایین دست کانال آزمایشگاهی، از یک دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده شده است. در این پژوهش آزمایشگاهی از میزان استغراق های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد استفاده شده است. علاوه بر آن به منظور برداشت عمق جریان از یک عمق سنج دستی استفاده شده است. مشخصات فنی مدل آزمایشگاهی دریچه سالونی بیضوی مورد استفاده شامل ورق گالوانیزه به ضخامت ۲ میلیمتر و به عرض و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر بوده که به دیواره فلوم لولا شده است (شکل ۱-ب). نتایج این آزمایش ها برای واسنجی مدل عددی استفاده می شود. فاصله دریچه ها از ابتدای فلوم ۴/۱ متر است. آزمایش های مورد استفاده به این منظور در این پژوهش با باز شدگی های ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲/۵ درجه نسبت به خط مرکزی است. در شکل (شکل ۱-پ) نمایی جانبی فلوم آزمایشگاهی و دریچه سالونی بیضوی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) مشاهده می گردد. در تحقیق حاضر با مساحت باز شدگی یکسان از چندین دریچه به جای یک دریچه برای تحلیل نتایج به صورت عددی و مدلسازی استفاده شده است و نتایج آزمایشگاهی (استفاده از تک دریچه بر اساس توضیحات یاد شده) برای اعتبارسنجی مدل عددی به کار گرفته شده است.



شکل ۱. الف: نمای پلان کانال (فلوم) آزمایشگاهی ب: نمای دریچه سالونی بیضوی آزمایشگاهی پ: نمای جانبی و جزئیات آن

۲. معادلات حاکم در مدل Flow-3D

در این پژوهش به منظور مدل سازی و بررسی تأثیر دریچه سالونی مستطیلی چندگانه در شرایط جریان مستغرق، از مدل Flow-3D که یک مدل بسیار قوی در زمینه CFD است استفاده شده است. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای مدل سازی استفاده خواهد شد. روش حجم سیال (VOF) که از طریق سعی و خطا و تحلیل هم زمان معادلات ناویر-استوکس و تلاطم با انواع روش های CFD به محاسبه پارامترهای نظیر سرعت و فشار می پردازد. روش دوم روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) بوده که در شبیه سازی سطوح و اجسام صلب نظیر مرزهای هندسی کاربرد دارد.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$$V_F \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + G_z + f_z \quad (5)$$

معادله (۱) شرط تراکم ناپذیری اصلاح شده را نشان می دهد (معمولاً در روش های عددی برای کوپل کردن فشار و سرعت استفاده می شود. در Flow-3D، این رابطه ممکن است به عنوان بخشی از الگوریتم تصحیح فشار (Pressure Poisson Equation) استفاده شود. معادله (۲)، رابطه پیوستگی بوده که به طور کلی برای شرایط تراکم ناپذیری در تحقیق حاضر استفاده می شود و عملاً تغییرات زمانی دانسیته برابر با صفر می شود. معادلات (۳) تا (۵) معادله مومنتم یا اندازه حرکت در سه راستا هستند. به هر حال در این معادلات پارامتر V_F نسبت کسر حجمی فضای آزاد به جریان سیال، پارامتر ρ دانسیته سیال، پارامتر R_{DIF} معرف پخش تلاطم و همچنین پارامتر R_{SOR} معرف منبع جرم است. مولفه های (u, v, w) مربوط به مولفه های سرعت در جهت های (x, y, z) و یا (r, z, θ) می باشند. مولفه های (A_x, A_y, A_z) معرف مقادیر کسرهای سطح مقطع هستند که مربوط به جریان آزاد بوده و در جهت های (x, y, z) می باشند. در معادلات بالا، مولفه های (G_z, G_y, G_x) نشان دهنده شتاب های بدنه، مولفه های (F_z, F_y, F_x) نشان دهنده شتاب های ویسکوز است.

۳. معادله ضریب دبی

ضریب تخلیه یا ضریب آبگذری دریچه، در واقع نشان دهنده میزان راندمان عملکردی یک سازه هیدرولیکی همانند دریچه است. رابطه (۶) مربوط به ضریب تخلیه بوده که با توجه به ابعاد دریچه و خصوصیات هیدرولیکی جریان و استفاده از معادله انرژی قابل اثبات است.

$$Q = C_d \times B \times Y_{up}^{1.5} \times \sqrt{\frac{2gS^2}{S+1}} \quad (6)$$

ضریب دبی، (CD)، بیان شده در معادله (۶) نشان دهنده ضریب مشخصی از دبی عبوری جریان از دریچه های سالونی است. معادله (۶) در واقع شامل یک فرمول مشخصه برای ارزیابی دبی است و نقش برجسته ای در طبقه بندی عملکرد هیدرولیکی دریچه های سالونی دارد. این معادله جهت محاسبه ضریب آبگذری عبوری از دریچه سالونی بیضوی، با به کارگیری رابطه برنولی بین دو مقطع ۱ و ۲ و استفاده از

شکل کانال و با توجه به رفتار هیدرولیکی دریاچه سالونی و اعمال کردن رابطه پیوستگی و ترکیب روابط، توسط (خیر و همکاران^۱، ۲۰۲۱) ارائه شده است. در این معادله Q دبی ورودی، B عرض، C_d ضریب تخلیه دبی، Y_{up} ارتفاع آب بالادست دریاچه و S نسبت استغراق بوده که از نسبت عمق پایین دست به عمق بالادست $(\frac{Y_t}{Y_u})$ به دست می آید.

در تحقیق حاضر از مدل Flow-3D برای دستیابی به اهداف مدنظر استفاده گردید. معادلات حاکم در این مدل همان معادلات (۱) تا (۵) بوده که بسته به مدل تلاطمی مورد استفاده برای شبیه سازی نرخ استهلاک انرژی جنبشی در جریان های آشفتنه قابل حل به صورت عددی است. همانگونه که در بخش قبل نیز اشاره شد، در این مدل از دو تکنیک عددی روش حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) استفاده می شود.

۴. سناریو و شرح انجام شبیه سازی

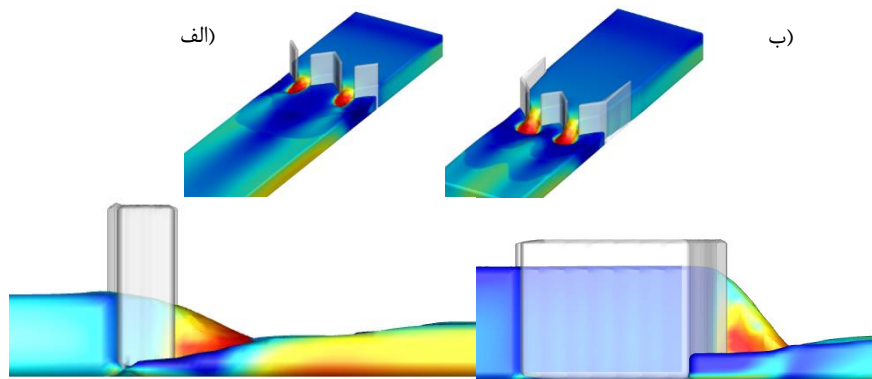
در تحقیق حاضر در مجموع ۱۸ سناریوی مختلف برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی دریاچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی شبیه سازی شد. در این سناریوها بازشدگی های (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه، دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه و زوایای تبدیل (۵ و ۱۰) درجه نسبت به دیواره فلوم در نظر گرفته شد. علاوه بر این، تعداد ۹ سناریوی شبیه سازی دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون استفاده از تبدیل تدریجی مطابق با تحقیق (کرم دخت بهبهانی و همکاران، ۱۴۰۲) نیز به مجموعه سناریوها افزوده گردید. در این سناریوهای ۹ گانه دبی ها و بازشدگی های یکسانی به جهت ارزیابی و مقایسه پارامترهای هیدرولیکی نظیر (تنش برشی حداکثر، ضریب دبی و الگوی جریان) با دریاچه دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی، در نرم افزار Flow-3D فراخوانی و مدل سازی گردید. جدول (۱) مشخصات فنی این سناریوها را به طور کلی نمایش می دهد.

جدول ۱. سناریو و پارامترهای هیدرولیک استفاده شده در شبیه سازی ها

دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی				دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه فاقد تبدیل تدریجی			
n	Q(l/s)	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	n	Q(l/s)	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$
1		30	5	10		30	-
2	20	45		11	20	45	
3		60		12		60	
4		20		13		20	
5	40	40		14	40	40	
6		60	10	15		60	
7		20		16		20	
8	60	40		17	60	40	
9		60		18		60	

در جدول (۱) n (شماره شبیه سازی)، Q (دبی عبوری جریان)، θ_1 (زاویه بازشدگی) و θ_2 (زاویه تبدیل تدریجی) است. همچنین شکل (۲)، نمایی از دریاچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی و بدون تبدیل تدریجی شبیه سازی شده را نشان می دهد.

¹ Kheybar et al



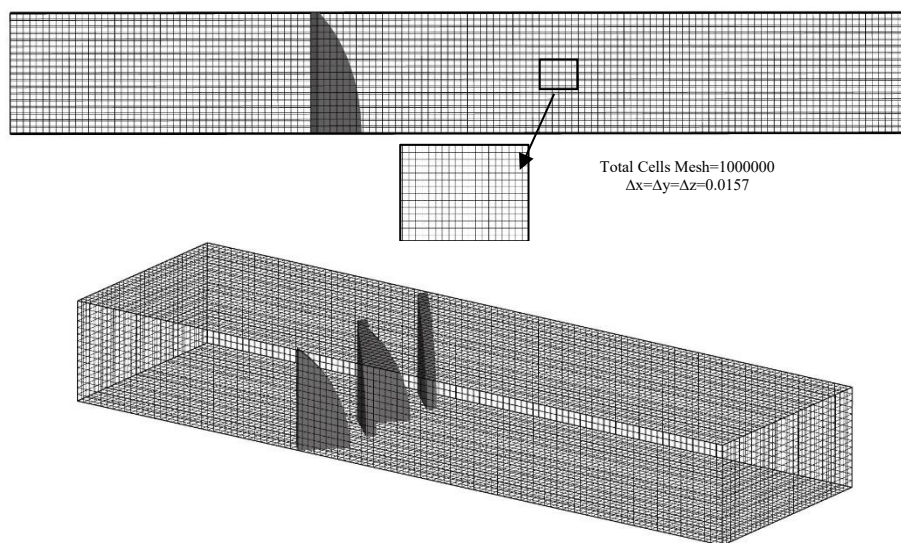
شکل ۲. نمای کلی از دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه مورد مطالعه در دو حالت الف: دریاچه به همراه تبدیل تدریجی ب: دریاچه فاقد تبدیل تدریجی

۵. مش بندی و شرایط مرزی در شبیه سازی مدل

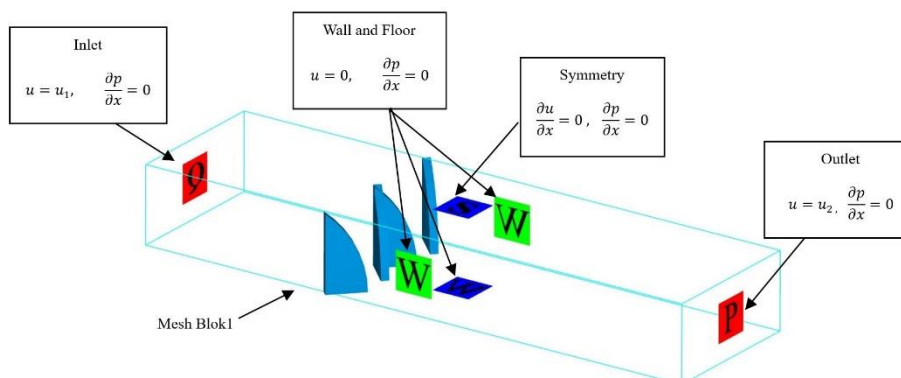
در این پژوهش ناحیه عددی از یک بلوک مش به منظور شبیه سازی دریاچه سالونی بیضوی استفاده شده است. به منظور دستیابی به بهترین مش بندی سه گروه مش با تعداد (۵۰۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰۰) برای کل حوزه بلوک مش انتخاب شد. به همین منظور در تحقیق حاضر، ابتدا شبیه سازی مدل آزمایشگاهی دریاچه سالونی مستطیلی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۵۲.۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد انجام شد. سپس مقایسه نتایج و انطباق آنها با داده های آزمایشگاهی در دستور کار قرار گرفت و در نهایت مش بندی بهینه برای مدل مذکور به دست آمد. برای این کار طبق جدول ۲ نتایج ضریب دبی مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی برای مدل دریاچه سالونی مقایسه و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE(%)) محاسبه شد. مطابق جدول ۲ درصد خطای مطلق بین نتایج آزمایشگاهی و عددی ۲/۰۴۸ درصد محاسبه شد. در جدول ۲ (دبی جریان-Q)، (زاویه بازشدگی- θ)، (میزان استغراق-S)، (ضریب دبی عددی- CD_{num}) و (ضریب دبی آزمایشگاهی- CD_{exp}) نشان داده شده است. باتوجه به اینکه اختلاف درصد خطای مش دوم و سوم ناچیز بوده، لذا مش دوم به عنوان مش بهینه با ۱۰۰۰۰۰۰ سلول مش انتخاب شد. در شکل ۴ دامنه محاسباتی و شبکه مش بندی دریاچه سالونی بیضوی چندگانه مورد بررسی نشان داده شده است. شرایط مرزی اعمال شده بر روی (Mesh Blok₁) در شکل ۵ نشان داده شده است. شرایط مرزی نرخ جریان خاص (میزان دبی حجمی-Q) برای ورودی جریان در بالادست دریاچه (X_{max}) استفاده شد. برای مرز پایین دست کانال (X_{min})، شرایط فشار جریان (فشار مشخص شده-P) به جهت ایجاد استغراق در پایین دست دریاچه انتخاب شد. برای مرز بالای شبکه شبیه سازی (Z_{max})، شرایط مرزی (مقارن-S) استفاده شد. این نوع شرایط مرزی شرایط سطح آزاد یا فشار اتمسفر را در نظر می گیرد.

جدول ۲. تحلیل حساسیت مش بندی در شبکه مدل عددی

MAPE (%)	CD_{num}	CD_{exp} (Pilbala et al, 2021)	Mesh cell	S (%)	θ (°)	Q (l/s)	case
16.692	0.8951	1/074483	500000	70	52.5	25	1
2.761	1.04475		1000000				2
2.048	1.05247		1500000				3

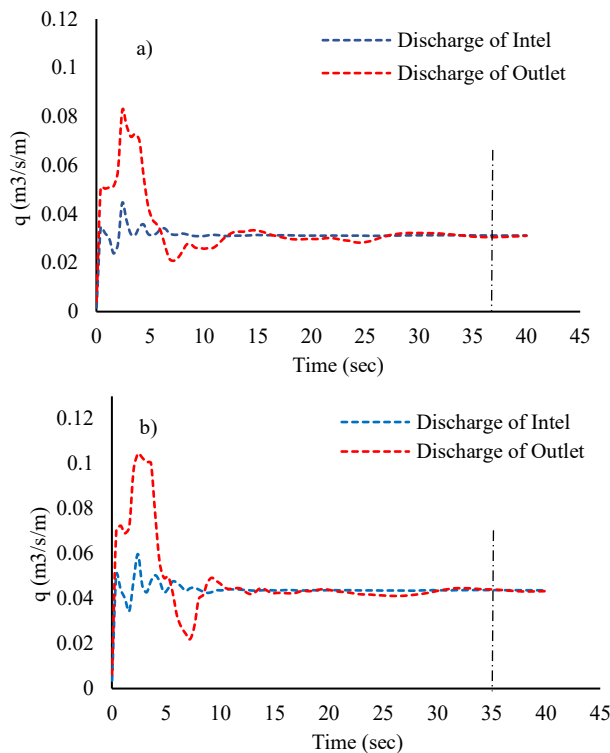


شکل ۴. مش بندی شبکه شبیه سازی



شکل ۵. شرایط مرزی اعمال شده بر روی دامنه محاسباتی دریچه بیضوی چندگانه مورد بررسی

برای دستیابی به اهداف مطابق با شبیه سازی های عددی نیاز است که همگرایی محاسبات عددی رخ دهد. این همگرایی راه حل های حالت پایدار در طول شبیه سازی با نظارت بر تغییرات دبی در شرایط مرزی ورودی کنترل شد. شکل ۶ نمودارهای سری زمانی دبی به دست آمده از مدل عددی با بازشدگی ۴۵ درجه، استغراق ۷۰ درصد در دو دبی اصلی ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد. آزمون و خطا در مورد زمان شبیه سازی نشان داد که ۳۵ ثانیه برای رسیدن به تعادل جریان به جهت شبیه سازی دریچه سالونی بیضوی چندگانه مناسب است. تقریباً تمام نوسانات دبی در مدل های بررسی شده از نظر زمانی ناچیز بوده و جریان به ثبات نسبی رسیده است. اما به منظور احتیاط بیشتر، زمان اجرای شبیه سازی روی ۴۰ ثانیه تنظیم شد.



شکل ۶. تغییرات زمانی با دبی در واحد عرض (q) در ورودی و خروجی حوزه شبیه سازی برای بازشدگی ۴۵ درجه، استغراق ۷۰ درصد و دبی (a) ۲۵ لیتر بر ثانیه (b) ۳۵ لیتر بر ثانیه

۶. انتخاب مدل آشفتگی

در نسخه های جدید نرم افزار Flow-3D مدل های آشفتگی شامل مدل های صفر معادله ای (طول اختلاط پراتل)، مدل یک معادله ای، مدل دو معادله ای ($K - \epsilon$)، مدل دارای معادله تنش (RNG) و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) هستند که معروف ترین آن ها در بحث سازه های هیدرولیکی معادله های LES، $K - \epsilon$ و RNG است. در این تحقیق از نسخه ۱۱ استفاده گردید.

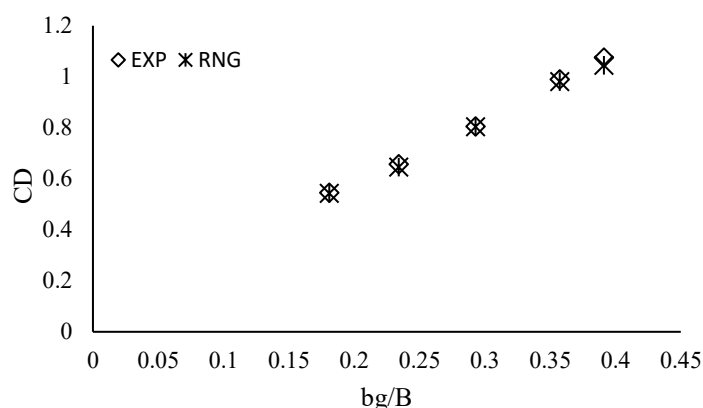
برای انتخاب عملکرد مدل های آشفتگی، از مقایسه نتایج ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد بازشدگی دریچه سالونی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی های (۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲.۵) درجه و در استغراق ۷۰ درصد استفاده شد. مدل های تلاطمی مورد استفاده برای این مقایسه در حل عددی، سه مدل آشفتگی (RNG , $K - \epsilon$, $K - \omega$) بودند. جدول (۳) نتایج ضریب دبی از شبیه سازی عددی Flow-3D و نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد. در جدول (۳) (دبی جریان - Q)، (زاویه بازشدگی - θ)، (بازشدگی بدون بعد - bg/B) و (میزان استغراق - S) نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می دهد که مدل آشفتگی RNG کمترین خطا را در مقایسه با دیگر مدل های آشفتگی داشته و دارای نزدیک ترین جواب به مدل آزمایشگاهی است. از این رو در تمامی شبیه سازی های تحقیق پیشرو از مدل آشفتگی RNG استفاده خواهد شد.

جدول ۳. درصد خطای نسبی به دست آمده از نتایج حل عددی برای سه مدل آشفتگی RNG ، $K - \epsilon$ و $K - \omega$

MAPE (%)			نتایج ضریب دبی				S (%)	bg/B (m)	θ (°)	Q (l/s)	مدل
K- ω	K- ϵ	RNG	K- ω	K- ϵ	RNG	(pilbala et al, 2021)	70	0/39	52/5	25	1
9/130	7/990	2/7601	0/976	0/988	1/044	1/074					
1/990	2/410	0/84	0/9699	0/965	0/98	0/989					2
6/440	4/450	0/21	0/7533	0/7699	0/803	0/8					
3/053	4/910	1/6501	0/6365	0/624	0/645	0/65					3
5/036	5/680	0/6101	0/5179	0/5144	0/542	0/54					
							70	0/35	50	25	2
							70	0/29	45	25	3
							70	0/23	40	25	4
							70	0/18	35	25	5

۷. صحت سنجی نتایج عددی و آزمایشگاهی

گام نهایی در انجام مدل سازی عددی صحت سنجی مدل شبیه سازی شده در Flow-3D با مدل آزمایشگاهی است. به این منظور ۵ مدل درجه سالونی مستطیلی از آزمایش های پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱) در دبی ۲۵ (لیتر بر ثانیه)، بازشدگی های (۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲.۵) درجه و استغراق ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. این آزمایش ها شبیه سازی شد و نتایج آن با مقادیر به دست آمده از آزمون های آزمایشگاهی مقایسه گردید. پس از بررسی های صورت گرفته مشخص شد که مدل سازی های انجام شده در نرم افزار Flow3D تفاوت چندانی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی نداشته و از درصد خطای کمی برخوردار بوده که مقدار آن ۱/۲۳ درصد است. نتایج صحت سنجی بین مقادیر مدل سازی عددی و مقایسه آن با نمونه ی آزمایشگاهی در شکل ۵ آمده است. در واقع در شکل ۵ درصد بازشدگی در برابر ضریب تخلیه برای مقادیر واقعی و شبیه سازی شده با یکدیگر مقایسه شده اند.



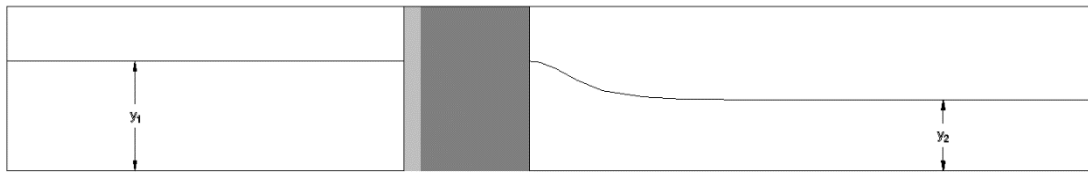
شکل ۵. نتایج صحت سنجی مدل آزمایشگاهی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) در مقایسه با شبیه سازی عددی

یافته های پژوهش

در این بخش نتایج به دست آمده از مدل سازی و محاسبه ویژگی های جریان خروجی از درجه های سالونی مستطیلی چندگانه با تبدیل تدریجی در حالت جریان آزاد در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، سه میزان زاویه بازشدگی (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه و با تبدیل های تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر این پارامترهای هیدرولیکی نظیر، تغییرات تنش برشی در کف، ضریب دبی و گردابه های جریان بررسی و با شرایط جریان آزاد درجه های سالونی بیضوی چندگانه بدون تبدیل تدریجی مقایسه شده است.

۱. بررسی ضریب دبی در درجه های سالونی چندگانه

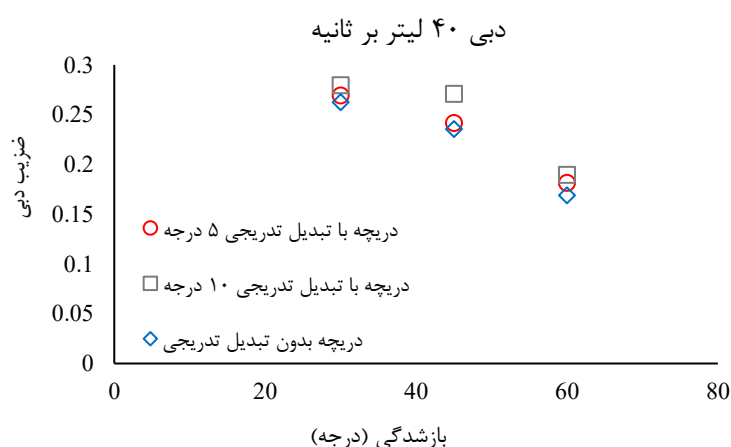
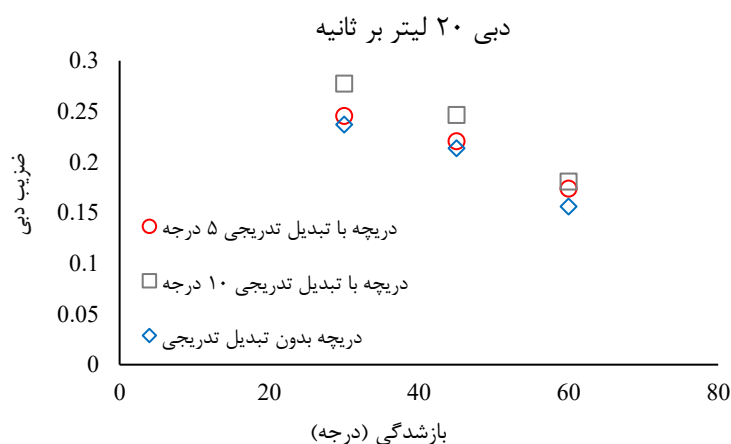
دریچه ها، سازه های هیدرولیکی تنظیم کننده و یا اندازه گیری جریان اند که عمود بر جهت جریان در مجاری روباز قرار می گیرند. دریچه های سالونی نیز به صورت عمود بر جهت جریان در کانال نصب شده و با تغییر زاویه بازشدگی دریچه، سطح آب بالادست خود را در رقوم مورد نظر تنظیم می نماید. همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، خیبر و همکاران (۲۰۲۱)، جهت محاسبه ضریب آبگذری عبوری از دریچه سالونی بیضوی، با به کارگیری رابطه انرژی قبل و بعد از دریچه و اعمال رابطه پیوستگی با ترکیب روابط، به معادله (۶) دست یافت. در واقع مطابق شکل (۶)، با نوشتن رابطه انرژی بین بالادست و پایین دست دریچه سالونی می توان به معادله اشاره شده (۶) دست یافت.



شکل ۶. پروفیل کلی جریان در بالادست و پایین دست دریچه سالونی در بازه مورد بررسی

در این بخش به بررسی و تحلیل تغییرات ضریب دبی نسبت به تغییرات بازشدگی در سه میزان دبی (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه و سه میزان بازشدگی (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می گردد، شکل های (۷) تغییرات ضریب دبی را در مقابل تغییرات میزان بازشدگی دریچه (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه نشان می دهد. با توجه به روند تغییرات ضریب دبی (CD) نسبت به بازشدگی های دریچه، (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه، مشاهده می گردد که مقادیر ضریب دبی با تغییرات دبی رابطه مستقیم داشته و با میزان درجه بازشدگی دریچه رابطه معکوس دارد. به طوری که با افزایش دبی عبوری جریان مقادیر عددی ضریب دبی افزایش یافته و با افزایش درجه بازشدگی دریچه، ضریب دبی عبوری روندی کاهشی به خود خواهد گرفت. با توجه به روند تغییرات ضریب دبی در شکل های (۷) مشاهده می گردد که با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه، ضریب دبی نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. به این صورت که مقدار ضریب دبی بر روی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۲/۴، ۳ و ۳/۴ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار ضریب دبی بر روی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۸، ۱۳ و ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. کمترین افزایش ضریب دبی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه، دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۳۰ درجه به

مقدار ۱.۳ درصد و بیشترین افزایش ضریب دبی مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۶۰ درجه به مقدار ۱۳/۵ درصد است.

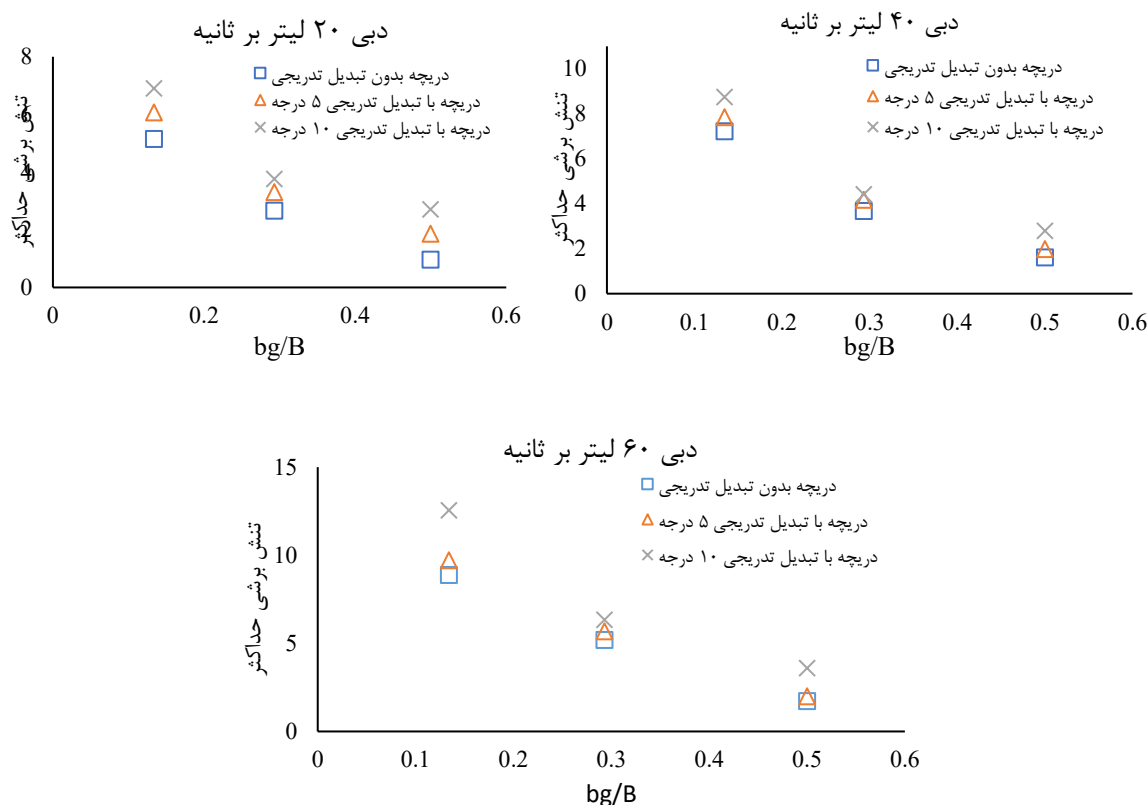


شکل ۷. تغییرات ضریب آبگذری نسبت به تغییرات بازشدگی دریچه

۲. بررسی تنش برشی در دریچه های سالونی چندگانه

شکل های (۸) تغییرات تنش برشی حداکثر را در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، نسبت به بازشدگی های (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه نشان می دهد که محور عمود مربوط به میزان تنش برشی حداکثر بوده و محور افق مربوط به بازشدگی های بدون بعد دریچه (۱۳۴/۰، ۲۹۳/۰ و ۵/۰) سانتی متر است. باتوجه به شکل های (۸) قابل مشاهده است که تنش برشی حداکثر با تغییرات دبی رابطه ای مستقیم داشته و با زاویه بازشدگی رابطه معکوس خواهد داشت. به نحوی که با افزایش دبی در بازشدگی های ثابت تغییرات

تنش برشی حداکثر روندی افزایشی داشته است. همچنین تنش برشی حداکثر در دبی ثابت، با افزایش مقدار بازشدگی، کاهش خواهد یافت. با توجه به روند تغییرات تنش حداکثر نسبت به تغییرات زاویه بازشدگی در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه در شکل‌های (۸) مشاهده می‌گردد که با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، تنش برشی حداکثر نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. به این صورت که مقدار تنش برشی حداکثر بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۲۷٪، ۱۳٪ و ۱۰٪ افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار تنش برشی حداکثر بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۵۱٪، ۲۱٪ و ۲۴٪ افزایش خواهد یافت. کمترین افزایش تنش برشی حداکثر دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه، دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۶۰ درجه به مقدار ۸٪ و بیشترین افزایش تنش برشی حداکثر مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۳۰ درجه به مقدار ۶۴٪ است.



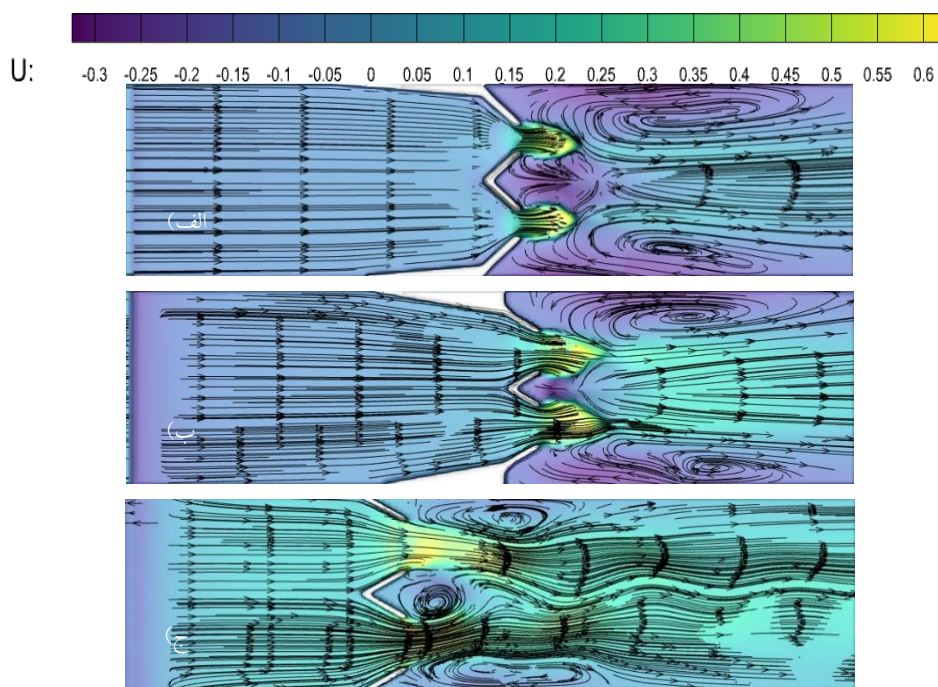
شکل ۸. تغییرات تنش برشی ماکزیمم نسبت به تغییرات عدد فرود

۳. بررسی گردابه‌های جریان در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه

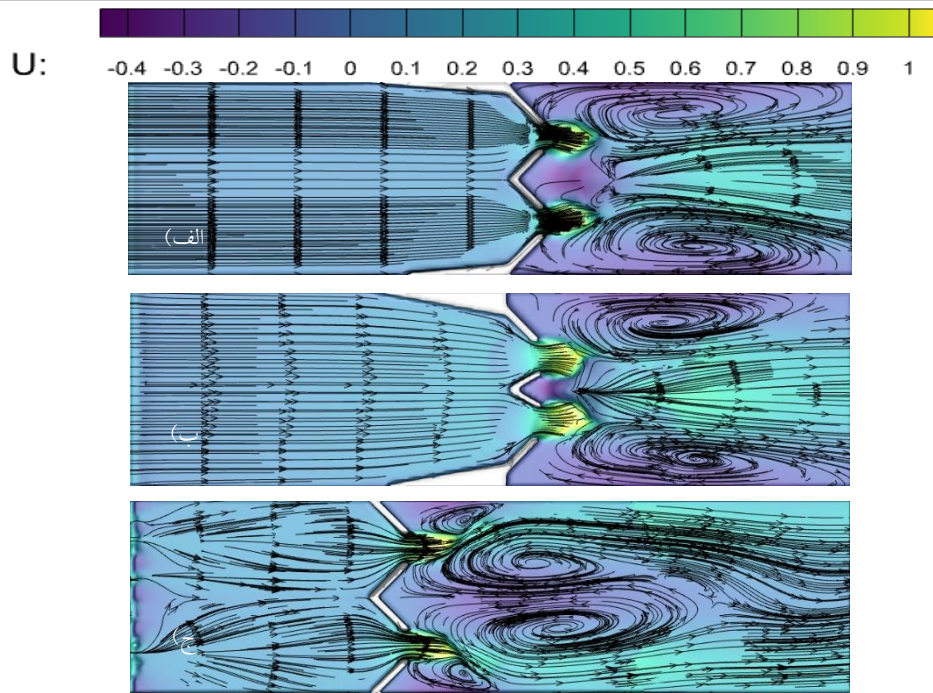
شکل‌های (۹ تا ۱۱) گردابه‌های ایجاد شده در اطراف دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه را در دبی ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی‌های (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه، برای هر دو حالت دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه و دریچه بدون تبدیل تدریجی را نشان می‌دهد. نوار راهنمای سرعت آبی، سبز، زرد و نارنجی در شکل‌های (۹ تا ۱۱) نشان‌دهنده مقادیر عددی و چگونگی توزیع نقادیر سرعت در بخش‌های مختلف کانال است. با توجه به چگونگی اختصاص رنگ به قسمت‌های مختلف کانال و اطراف دریچه و مشاهده محدوده توزیع سرعت مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه (افزایش تنگ‌شدگی) گردابه‌های جریان در اطراف دریچه و ابعاد و وسعت آن کاهش می‌یابد. این اتفاق نشان‌دهنده کاهش مقادیر

عددی سرعت جریان در بخش های مختلف کانال است. علاوه بر این بررسی های صورت گرفته نشان داد که ابعاد گردابه با میزان بازشدگی دریچه رابطه مستقیم خواهد داشت، به صورتی که هرچه زاویه بازشدگی افزایش یابد (دریچه تنگ تر شود) ابعاد و وسعت گردابه های ایجاد شده در اطراف دریچه نیز کاهش می یابد. با بررسی های صورت گرفته مشخص شد که در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه، گردابه های بزرگ با قدرت بالا و محدوده بزرگ در کناره های دریچه و در نزدیکی دیواره های کانال مشاهده می گردد که تا پایاب دریچه نیز ادامه دارد. اما در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی، وسعت و قدرت گردابه های جریان کاهش یافته و تعداد گردابه های به وجود آمده در اطراف دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی در مقایسه با زمانی که از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی استفاده می شود افزایش خواهد یافت.

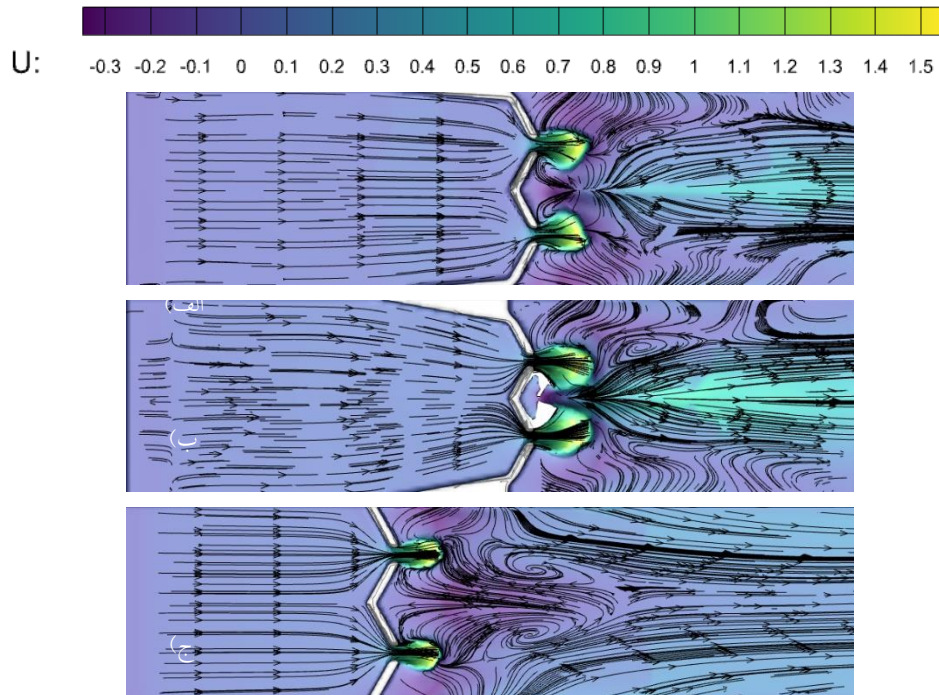
علاوه بر این نتایج نشان داد که گردابه های ایجاد شده جریان اطراف دریچه سالونی اغلب در نزدیکی دریچه به وجود می آید که این پدیده با مشاهده کاهش مقادیر سرعت و تغییر رنگ در این نواحی قابل مشاهده خواهد بود. در انتها باتوجه به شکل های (۹ تا ۱۱) مربوط به دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی مشخص شد که جریان آب و گردابه ها به طرف دیواره های کانال منحرف می شود. اما باتوجه به شکل های (۹ تا ۱۱) مربوط به دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی در زوایای بازشدگی (۴۵ و ۶۰) درجه مشخص شد که جریان و گردابه های ایجاد شده اغلب در مرکز کانال به وجود می آید که این پدیده باعث فرسایش و آبستگی در مرکز کانال می شود.



شکل ۹. میدان سرعت دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۳۰ درجه (الف) دریچه با تبدیل ۵ درجه (ب) دریچه با تبدیل ۱۰ درجه (ج) دریچه بدون تبدیل



شکل ۱۰. میدان سرعت دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۴۵ درجه (الف) دریچه با تبدیل ۵ درجه (ب) دریچه با تبدیل ۱۰ درجه (ج) دریچه بدون تبدیل



شکل ۱۱. میدان سرعت دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۶۰ درجه (الف) دریچه با تبدیل ۵ درجه (ب) دریچه با تبدیل ۱۰ درجه (ج) دریچه بدون تبدیل

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تبدیل تدریجی تأثیر قابل توجهی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارد. افزایش دبی موجب افزایش تنش برشی حداکثر و ضریب دبی شده، درحالی که افزایش میزان بازشدگی دریچه در دبی ثابت، کاهش این دو پارامتر را به دنبال دارد. مقایسه دو آرایش نشان داد که ایجاد تبدیل تدریجی، اگرچه موجب افزایش ضریب دبی و در نتیجه بهبود ظرفیت عبور جریان می‌شود، اما هم‌زمان تنش برشی حداکثر وارد بر کف کانال را نیز افزایش می‌دهد که می‌تواند از دیدگاه پایداری و فرسایش بستر حائز اهمیت باشد. ازسوی دیگر، بررسی ساختار گردابه‌ای جریان نشان داد که استفاده از تبدیل تدریجی با زوایای ۵ و ۱۰ درجه، موجب شکل‌گیری گردابه‌هایی بزرگ‌تر و قوی‌تر در مجاورت دریچه و دیواره‌های کانال و تداوم آن‌ها در پایین دست می‌شود؛ در مقابل، در حالت بدون تبدیل تدریجی، اگرچه تعداد گردابه‌های ایجادشده در اطراف دریچه افزایش می‌یابد، اما وسعت و شدت آن‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین، می‌توان گفت تبدیل تدریجی با ایجاد نوعی مبادله بین افزایش ظرفیت عبور جریان و افزایش تنش برشی و شدت گردابه‌ها همراه است و انتخاب زاویه مناسب تبدیل باید با توجه هم‌زمان به عملکرد هیدرولیکی دریچه، کنترل آشفتگی جریان و ملاحظات مربوط به پایداری و فرسایش کف کانال انجام شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی عددی تأثیر تبدیل تدریجی بر عملکرد دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در شرایط جریان آزاد و مقایسه آن با دریچه‌های سالونی چندگانه بدون تبدیل تدریجی و بررسی پارامترهایی نظیر ضریب دبی، تنش برشی حداکثر وارد بر کف کانال و گردابه‌های جریان در دبی‌ها و بازشدگی‌های متفاوت پرداخته شده است. نتایج نشان داد، تنش برشی حداکثر با تغییرات دبی رابطه‌ای مستقیم داشته و با زاویه بازشدگی رابطه معکوس خواهد داشت. به‌نحوی که با افزایش دبی در بازشدگی‌های ثابت تغییرات تنش برشی حداکثر روندی افزایشی داشته است. همچنین تنش برشی حداکثر در دبی ثابت، با افزایش مقدار بازشدگی، کاهش خواهد یافت. همچنین با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، تنش برشی حداکثر نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. بررسی‌ها نشان داد، مقادیر ضریب دبی با تغییرات دبی رابطه مستقیم داشته و با میزان درجه بازشدگی دریچه رابطه معکوس دارد. به‌طوری که با افزایش دبی عبوری جریان مقادیر عددی ضریب دبی افزایش یافته و با افزایش درجه بازشدگی دریچه، ضریب دبی عبوری روندی کاهشی به خود خواهد گرفت. همچنین با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، ضریب دبی نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. در خصوص بررسی گردابه‌های جریان نتایج نشان داد که در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه، گردابه‌های بزرگ با قدرت بالا و محدوده بزرگ در کناره‌های دریچه و در نزدیکی دیواره‌های کانال مشاهده می‌گردد که تا پایین دست دریچه نیز ادامه دارد. اما در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی، وسعت و قدرت گردابه‌های جریان کاهش یافته و تعداد گردابه‌های به وجود آمده در اطراف دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی در مقایسه با زمانی که از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی استفاده می‌شود افزایش خواهد یافت.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- احدیان، جواد، و افضلیان، علیرضا. (۱۳۹۶). تحلیل کاربردی سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان یک سد انحرافی. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۴۹ (۳)، ۴۷۶-۴۶۳. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.694>
- احدیان، جواد، و افضلیان، علیرضا. (۱۳۹۵). هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی تحت هندسه‌ی متفاوت پایه‌ها. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳ (۲)، ۲۶۷-۲۷۷. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3068>
- افضلیان، علیرضا، و احدیان، جواد. (۱۳۹۴). سرریز کلید پیانویی با پاراپت‌وال‌های زاویه‌دار. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸ (۲)، ۹۱-۱۰۲. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351>
- خیبر، هومن، سجادی، سید محسن، و احدیان، جواد. (۱۳۹۹). بررسی استهلاک انرژی و دبی عبوری از دریچه سالونی- بیضوی در شرایط وجود تبدیل ناگهانی. نشریه علوم آب و خاک، ۲۴ (۳)، ۸۳-۹۵. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351>
- خیبر، هومن، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و قمشی، مهدی. (۱۴۰۴). بررسی هیدرولیک سرریزهای جانبی لولایی با آستانه. مجله تحقیقات آب و خاک/ایران، ۵۶ (۱)، ۲۴۶-۲۲۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790>
- خیبر، هومن، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و قمشی، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی ضریب دبی و راندمان سرریزهای جانبی لولایی با آستانه. مجله رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۳ (۲)، ۷۲-۸۸. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096>
- سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و قنواتی، محبوبه. (۱۳۹۶). بررسی استهلاک انرژی جریان گذرنده از روی سرریز کلید پیانویی با کلید خروجی مانع‌دار. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۸ (۶۹)، ۷۷-۹۲. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.108456.1165>
- سلمان‌زاده، سمیرا، فتحی مقدم، منوچهر، احدیان، جواد، و سجادی، سید محسن. (۱۴۰۳). بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ در پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر. نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۷ (۱)، ۱۵-۳۱. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.41559.2035>
- شفاعی بجستان، محمود، زینی وند، مهدی، طهماسبی پور، محسن. (۱۳۹۹). ضریب دبی دریچه سالونی بیضوی همراه با تبدیل تدریجی در شرایط مستغرق. نشریه هیدرولیک، ۱۵ (۲)، ۶۷-۸۰. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.225028.1449>
- طاهری طلاوری، طوبی، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، عزیزی نادیان، حسین. (۱۴۰۳). بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق. نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴ (۳)، ۴۰-۶۰. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10747.1127>
- فتحی، ستاره، سجادی، سید محسن، احدیان، جواد، و پارسائی، عباس. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر استغراق‌های مختلف بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در دریچه سالونی مستطیلی چندگانه. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۲۴۹-۲۶۱. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365670.1106>
- فتحی، ستاره، سجادی، سید محسن، و احدیان، جواد. (۱۴۰۳). بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی دریچه سالونی چندگانه مستطیلی در جریان مستغرق. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۲)، ۷۹-۹۸. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22395.3728>
- منصوری، کوثر، و احدیان، جواد. (۱۳۹۵). انسداد سرریزهای کلید پیانویی در جریان‌های آواری با سیستم آزمایش‌های انفرادی. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹ (۳)، ۱۷۲-۱۶۳. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12352>
- نیسی، مصطفی، سجادی، محسن، شفاعی بجستان، محمود، و احدیان، جواد. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سرریز جانبی مثلثی لبه شیب‌دار در شرایط زیر بحرانی. علوم آب و خاک، ۲۸ (۳)، ۱۱۷-۱۲۹. <https://doi.org/10.47176/jwss.28.3.19853>

یارمحمدی، بهاره، و احدیان، جواد. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان سرریز کلید پیانویی در ترکیب های مختلف دیواره سپری. *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹ (۴)، ۴۷-۵۸. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12495>

یوسفوند، فاطمه، منعم، محمد جواد، و کاویانپور، محمدرضا. (۱۳۹۴). ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق. *شریه آبیاری و زهکشی ایران* ۹ (۵)، ۸۱۱-۸۱۹. https://idj.iaid.ir/article_55126.html?lang=fa

References

- Aqua Systems 2000 Incorporation (AS21). (2013). Leaders in Water Management and Control. <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate>
- Afzalian, A. R., & Ahadiyan, J. (2015). Piano key weir with sloped parapet wall, *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(2), 91-102. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351> [In Persian]
- Ahadiyan, J., & Afzalian, A. (2016). Effect of Pier Geometry on the Hydraulic Properties of Piano Key Weirs, *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2), 267-277. <https://doi.org/10.22069/jwfs.2016.3068> [In Persian]
- Afzalian, A. R., & Ahadiyan, J. (2015). Piano key weir with sloped parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(2), 91-102. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351> [In Persian]
- Ahadiyan, J., Sadeghi, B., Shafai Bejestan, M., & Sajjadi, S. M. (2024). Effect of longitudinal training wall (LTW) on improving the inlet flow pattern at the side channel intakes. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(4), 51-67. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10776.1128> [In Persian]
- Ahadian, J., & Afzalian, A. (2017). Applied analysis of Piano Key Weir (PKW) structures as a diversion dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 463-476. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.694> [In Persian]
- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (2024). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003>
- Alabedi, H. J., & Khassaf, S. I. (2024). Numerical study on the discharge capacity of a piano key side weir with various ratios of the crest length to the width. *Open Engineering*, 14(1), 1-10, 20220536. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0536>
- Carollo, F. G., Ferro, V., & Pampalone, V. (2012). Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth-weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 73-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000366)
- Chenari, S. A., Nadian, H. A., Ahadiyan, J., Valipour, M., Oliveto, G., & Sajjadi, S. M. (2024). Enhancing hydraulic efficiency of side intakes using spur dikes: A case study of Hemmat water intake, Iran. *Water*, 16(16), 2254. <https://doi.org/10.3390/w16162254>
- Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics. *McGraw-Hill Book Company, Inc.*, New York, NY, USA. <https://books.google.com/books?id=OwZSAAAAMAAJ>
- Cox, A. L., Kullberg, E. G., MacKenzie, K. A., & Thornton, C. I. (2014). Stage-discharge rating equation for an elliptical sharp-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 04014018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000730](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000730)
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: An experimental and numerical analysis. *Fluids*, 7(7), 244. <https://doi.org/10.3390/fluids7070244>
- Eizeldin, M. A., Ali, A. M., & Farag, A. S. (2023). Investigation of flow characteristics downstream vertical sluice gates of the Bahr Yousef regulator physical model. *Water Science*, 37(1), 225-238. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2236385>
- Fathi, S., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Parsaie, A. (2024). Investigation of the effect of different submerging on the flow hydraulic parameters in multiple rectangular LOPAC gates. *Water and Irrigation Management*, 14(2), 249-261. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365670.1106> [In Persian]

- Fathi, S., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2024). Investigating the hydrodynamic characteristics of the multiple rectangular LOPAC gates in submerged flow. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(2), 79–98. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22395.3728> [In Persian]
- Fathi-Moghadam, M., Salmanzadeh, S., Ahadiyan, J., & Sajjadi, M. (2024). Drag coefficient of rigid and flexible deciduous trees in riparian forests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(5), 04024027. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13709>
- Hayawi, H. A. M., Yahia, A. A. G., & Hayawi, G. A. M. (2008). Free combined flow over a triangular weir and under a rectangular gate. *Damascus University Journal*, 24(1), 9–22. <https://damascusuniversity.edu.sy/mag/law/images/stories/9-22.pdf>
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2024). Hydraulic investigation of the flow through multiple rectangular LOPAC gates in free flow and submerged mode by Flow-3D software. *Irrigation and Water Engineering*, 14(4), 19–32. <https://doi.org/10.22125/iwe.2024.437092.1786> [In Persian]
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Abraham, J., & Azizi-Nadian, H. (2025). Hydraulic performance of multiple and single LOPAC gates. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, jws2025280. <https://doi.org/10.2166/aqua.2025.280>
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Azizi-Nadian, H., & Abraham, J. (2025). Hydraulic performance of multiple and single LOPAC gates. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, jws2025280. <https://doi.org/10.2166/aqua.2025.280>
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of the flow through multiple rectangular LOPAC gates with Flow-3D software. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28(1), 51–64. <https://doi.org/10.47176/jwss.28.1.19852> [In Persian]
- Kheibar, H., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2020). Evaluation of energy dissipation and flow rate of elliptical-LOPAC gate under sudden transition condition. *Journal of Water and Soil Sciences*, 24(3), 83–95. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3947-en.html> [In Persian]
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2021). Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1145–1154. <https://doi.org/10.1002/ird.2622>
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Ghomeshi, M. (2025). Investigating the discharge coefficient and efficiency of the pivot side weirs with threshold. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(2), 72–88. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096> [In Persian]
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Ghomeshi, M. (2025). Hydraulic analysis of pivot side weirs with sill. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1), 229–246. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790> [In Persian]
- Craig, K. R., Elser, P. G., Allen, L., & Langeman, P. (2006). Irrigation gate system (U.S. Patent No. 7,114,878 B2). *United States Patent and Trademark Office*, Washington, DC, USA. <https://patents.google.com/patent/US7114878B2>
- Mansouri, K., & Ahadian, J. (2016). Blockage of piano key weirs in debris flow with individual experiments. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), 163–172. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12352> [In Persian]
- Mobarak, F., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Zeynivand, M. (2022). Numerical modeling of the effect of elliptical elongation on the hydraulic performance of an elliptical LOPAC gate. *Water and Irrigation Management*, 12(2), 263–275. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.335817.952> [In Persian]

- Negm, A. M., Abdelaal, G. M., Elfiky, M. M., Abdalla, Y. M., & Afifi, M. (2006). Effects of multi-gates operations on bottom velocity pattern under submerged flow conditions. In *Proceedings of the 10th International Water Technology Conference (IWTC10)*, Alexandria, Egypt. https://www.academia.edu/7712760/Effects_of_Multi_Gates_Operations_on_Bottom_Velocity_Pattern_Under_Submerged_Flow_Conditions
- Negm, A. A. M., Al-Brahim, A. M., & Alhamid, A. A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 359–365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>
- Neisi, M., Sajjadi, M., Shafai Bejestan, M., & Ahadiyan, J. (2024). Experimental study of flow over the triangular side weir with inclined crest in subcritical flow. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28(3), 117–129. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4423-en.html> [In Persian]
- Oad, R., & Kinzli, K. (2006). SCADA employed in Middle Rio Grande Valley to help deliver water efficiently. *Colorado Water Newsletter of the Water Center at Colorado State University*, Colorado, USA. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=868983>
- Pilbala, A., Sajjadi, S., & Bejestan, M. S. (2021). Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.007>
- Pilbala, A., Shafai Bejestan, M., Sajjadi, S. M., & Fraccarollo, L. (2023). Investigation of the different models of elliptical-LOPAC gate performance under submerged flow conditions. *Water Resources Management*, 37, 3527–3542. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03512-1>
- Puri, D., Sihag, P., Sadeghifar, T., Dursun, O. F., & Thakur, M. S. (2023). Soft computing-based model development for estimating the aeration efficiency through Parshall flume and Venturi flumes. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6(3), 401–413. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00153-0>
- Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Qanavati, M. (2017). Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(69), 77–92. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.108456.1165> [In Persian]
- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., & Khedri, P. (2023). Redesigning the fuse plug, emergency spillway, and flood warning system: An application of flood management. *Water*, 16(24), 3694. <https://doi.org/10.3390/w16243694>
- Sajjadi, S. M., Kheibar, H., & Ahadiyan, J. (2020). Investigation of the effect of sudden transition on the elliptical-LOPAC gate discharge coefficient under submerged flow conditions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(1), 115–124. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1399.14.1.10.3> [In Persian]
- Salahi, K., Ahadiyan, J., Zeng, Y.-H., Azizi, H. N., & Sajjadi, S. M. (2024). Laboratory investigation of the effect of particle and vegetation roughness on changes in drag force in an open channel. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 12(3), 221–230. <https://doi.org/10.5890/JEAM2024.09>
- Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., & Sajjadi, S. M. (2024). Investigation of the effective parameters on the drag coefficient in rigid and flexible vegetation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), 15–31. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.41559.2035> [In Persian]
- Shaddehi, F. R., & Bijankhan, M. (2020). Experimental study on free and submerged multi-jets. *Flow Measurement and Instrumentation*, 75, 101805. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101805>

- Shafai Bejestan, M., Zeinivand, M., & Tahmasebi Poor, M. (2020). Discharge coefficient of elliptical LOPAC gate with gradual transition in submergence condition. *Journal of Hydraulics*, 15(2), 67–80. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.225028.1449> [In Persian]
- Sharififard, E., Azizipour, M., Ahadiyan, J., & Haghighi, A. (2024). Determination of creep function coefficients of viscoelastic pipes using a transient-guided machine learning model. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(11), 2132–2149. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.091>
- Sihag, P., Nouri, M., Ahmadpari, H., Seyedzadeh, A., & Kisi, O. (2022). Approximation of the discharge coefficient of radial gates using metaheuristic regression approaches. *Sustainability*, 14(22), 15145. <https://doi.org/10.3390/su142215145>
- Skogerboe, G. V., Bennett, R. S., & Walker, W. R. (1972). Generalized discharge relations for cutthroat flumes. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 98(4), 569–583. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000891>
- Taheri Talavari, T., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Azizi Nadian, H. (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic LOPAC gates with Flow-3D software. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 40–60. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10747.1127> [In Persian]
- Tao, H., Jamei, M., Ahmadianfar, I., Khedher, K. M., Farooque, A. A., & Yaseen, Z. M. (2022). Discharge coefficient prediction of canal radial gate using neurocomputing models: An investigation of free and submerged flow scenarios. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2002721>
- Yarmohammadi, B., & Ahadian, J. (2016). Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 47–58. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12495> [In Persian]
- Yousofvand, F., Monem, M. J., & Kavianpour, M. R. (2015). Experimental and theoretical analysis of discharge coefficient for submerged LOPAC gate. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(5), 811–819. https://idj.iaid.ir/article_55126.html?lang=en [In Persian]